

ВЫДЕЛЕНИЕ АМЕРИЦИЯ ИЗ АКТИНИД-ЛАНТАНИДНОЙ ФРАКЦИИ ВЫСОКОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ ПРИ ЕГО ПЕРЕВОДЕ В СОСТОЯНИЕ ОКИСЛЕНИЯ Am(V)

© 2023 г. П. А. Осин*, Т. И. Трофимов, К. С. Пилюшенко, Ю. М. Куляко, С. Е. Винокуров, Б. Ф. Мясоедов

*Институт геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского РАН,
119991, Москва, ул. Косыгина, д. 19
* e-mail: Posingeohi@rambler.ru*

Поступила в редакцию 02.12.2022, после доработки 28.12.2022, принята к публикации 30.12.2022

Показаны условия окисления Am(III) до Am(VI), его восстановления до Am(V) и определена устойчивость этих форм в 0.1 моль/л азотнокислом модельном растворе актинид-лантанидной фракции высокоактивных отходов (ВАО), содержащем изотопы америция и кюрия, а также празеодим как имитатор поведения осколочных лантанидов. Установлено, что около 30% америция в состоянии окисления Am(V) от его исходного содержания в модельном растворе, содержащем высаливатель – нитрат аммония – в количестве 8 моль/л, переходит в органическую фазу за одну стадию экстракции 30%-ным раствором трибутилфосфата в разбавителе Изопар М. При этом Cm и Pr экстрагируются на 80–85%. Коэффициент распределения Am составил около 0.1, Cm и Pr – около 1, а фактор отделения Am от Cm и Pr составил около 10. Таким образом, показана возможность селективного выделения америция из ВАО для его последующей трансмутации в быстрых реакторах.

Ключевые слова: америций, кюриий, лантаниды, празеодим, экстракция, трибутилфосфат, выделение, разделение, высаливатель

DOI: 10.31857/S0033831123020089, **EDN:** XLTBWF

ВВЕДЕНИЕ

Технология переработки отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) основана на экстракционном Пурекс-процессе, в котором в качестве экстрагента используется трибутилфосфат (ТБФ) в легком разбавителе. После извлечения урана и плутония из раствора ОЯТ в рафинате остаются трансплутониевые элементы (ТПЭ) – долгоживущие изотопы $^{241,243}\text{Am}$ ($T_{1/2} = 433$ и 7370 лет соответственно) и относительно короткоживущий ^{244}Cm ($T_{1/2} = 18$ лет), а также группа осколочных лантанидов. При этом через несколько сотен лет основной вклад в радиоактивность ВАО будут вносить долгоживущие изотопы америция. Современная стратегия развития атомной энергетики России предусматривает замыкание ядерного топливного цикла (ЯТЦ), включая минимизацию объемов радиоактивных отходов для

глубинного захоронения, что может быть достигнуто при глубоком фракционировании ВАО, позволяющем выделенный в самостоятельную фракцию америций затем трансмутировать в реакторах на быстрых нейтронах [1].

Ранее нами был предложен способ выделения актинид-лантанидной фракции из высокоактивного рафината при экстракции ТБФ в изопарафиновом разбавителе в присутствии нитрата железа как высаливателя [2]. При этом одной из важнейших радиохимических задач является последующее отделение америция от кюрия и лантанидов. Такое разделение необходимо по ряду причин. Во-первых, лантаниды являются нейтронными ядами; некоторые изотопы имеют высокое сечение захвата нейтронов, и их присутствие в топливе будет ингибировать трансмутацию америция [3, 4]. Во-вторых, вовлечение изотопов кюрия в замкнутый ЯТЦ пробле-

матично, поскольку он обладает высоким уровнем нейтронного и теплового излучения, что усложнит изготовление и эксплуатацию регенерированного гомогенного ядерного топлива или мишеней америция для его трансмутации.

Известная проблема разделения Am, Cm и лантанидов определяется сходством в их химических свойствах [5, 6]. ТПЭ и лантаниды являются $5f$ - и $4f$ -элементами соответственно, они характеризуются заполнением внутренних f -орбиталей с увеличением атомного номера. Это оказывает небольшое влияние на химические свойства, которые в основном зависят от процессов во внешних электронных оболочках. Ввиду этого эти элементы преимущественно существуют в водных растворах в состоянии окисления (III). Ионные радиусы этих катионов также сопоставимы. Ионы америция и кюрия имеют изоструктурные аналоги в серии лантанидов: $r(\text{Nd}^{3+}) \approx r(\text{Am}^{3+})$, $r(\text{Sm}^{3+}) \approx r(\text{Cm}^{3+})$. В результате затруднено отделение трехвалентных Am и Cm от лантанидов путем корректировки только размера координационной сферы органических лигандов.

Существует несколько подходов к разделению Am от Cm и лантанидов, и большинство из них основано на экстракционных методах [7, 8]. Ключевым различием между этими катионами является то, что америций может окисляться до высших состояний окисления Am(V,VI), что меняет его поведение при экстракции [9, 10]. Ранее в наших работах [11, 12] показано, что, получив Am(VI) в слабнокислых растворах, можно извлечь Cm(III) из их смеси, используя экстрагенты 1-фенил-3-метил-4-бензоил-пирозолон-5 и триоктилфосфиноксид, тогда как Am(VI), восстанавливаясь органической фазой до Am(V), остается в водном растворе. При этом применение этих экстрагентов в производственных условиях проблематично. По этой причине предложено [13] для решения задачи по разделению Am от Cm использовать ТБФ как надежный и хорошо опробованный в технологии экстрагент. Так, кюрий извлекали из растворов, содержащих ≤ 0.1 М HNO_3 и ~ 8 М NH_4NO_3 , с помощью 30%-ного ТБФ в Изопаре М практически количественно, тогда как америций только частично ($\leq 30\%$) переходил в органическую фазу в виде Am(III). При этом достигалась высокая степень отделения Cm от Am(V), остающегося в водной фазе ($\geq 99.9\%$).

На данный момент известно лишь несколько других работ [14–16] по использованию ТБФ в качестве экстрагента для отделения Am от других трансурановых элементов или лантанидов. Например, в работах [14, 16] предложено проводить экстракцию Am(VI) напрямую из азотнокислых растворов без добавления высаливателя. Достижения высоких коэффициентов распределения удастся добиться путем корректировки кислотности раствора. На первоначальном этапе предлагается снижать кислотность для эффективного окисления Am(III) до Am(VI), затем увеличивать до 1 М по HNO_3 . Коэффициент разделения для пары Am–Nd составил около 50; в то же время разделение пары Am–Np не происходило. В работе [15] предложено использовать дигидрофосфат для связывания Nd в более устойчивый комплекс по сравнению с Am(VI), и таким образом удастся добиться коэффициента разделения около 120.

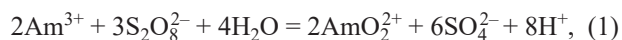
Настоящая работа посвящена изучению экстракции Am в высших состояниях окисления в слабнокислых растворах – имитаторах актинид-лантанидной фракции высокоактивного рафината, содержащих изотопы америция и кюрия и весовые количества лантанидов (на примере празеодима) – при использовании ТБФ и в присутствии нитрата аммония, как высаливателя, не образующего нерастворимых солей с актинидами и продуктами деления, в том числе с лантанидами.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Элементный состав ОЯТ реакторов типа ВВЭР-1000 с выгоранием 60 ГВт·сут/(т U) и выдержкой 8 лет рассчитан в работе [17]. Показано, что на долю осколочных лантанидов приходится 17.2 мг на 1 г исходного урана. При условии, что при растворении ОЯТ планируется достижение концентрации урана до 600 г/л, на долю актинид-лантанидной фракции будет приходиться до 10.5 г/л осколочных лантанидов. В качестве имитатора лантанидов в данной работе использовали Pr, полосы поглощения которого не совпадают с полосами поглощения Am(III), Am(V) и Am(VI), что позволяет определять концентрации в растворе как Pr, так и Am в различных состояниях окисления методом спектрофотометрии.

Для приготовления модельного раствора актинид-лантанидной фракции использовали изотопы ^{241}Am , ^{243}Am , ^{244}Cm , концентрации которых в исходном растворе соответственно были равны 2.48×10^{-3} , 1.28×10^{-1} , 1.38×10^{-4} г/л. Концентрация Pr составляла 10.5 г/л.

Перевод америция в высшие состояния окисления Am(VI) и затем в Am(V) осуществляли согласно нижеприведенных реакций (1) и (2) соответственно:



Окисляли Am(III) до Am(VI) в растворе 0.1 моль/л HNO_3 , содержащем в качестве окислителя 0.2 моль/л $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$ при нагревании раствора при 90°C в течение 20 мин в соответствии с методикой, описанной в работе [11]. Эффективность данного способа обычно ограничивается концентрациями азотной кислоты не более 0.5 М [18]. При более высоких концентрациях кислоты персульфат аммония разлагается с образованием перекиси водорода – эффективного восстановителя для AmO_2^{2+} [19]. Однако этот эффект, судя по всему, можно нивелировать путем увеличения концентрации окислителя до 1.6 М [14]; тогда удавалось окислить Am(III) до Am(VI) в 1 М HNO_3 на $90 \pm 5\%$.

Раствор, содержащий Am(V), получали добавлением 1 мкл раствора 37%-ного H_2O_2 к 1 мл раствора Am(VI) в 0.1 моль/л HNO_3 , предварительно полученного, как описано выше. Авторы работы [20] сообщают о возможности прямого получения Am(V) в 0.1 М HNO_3 при нагревании до $80\text{--}100^\circ\text{C}$ и концентрации персульфата аммония 1 моль/л.

Полноту окисления Am(III) до Am(VI) и его последующего восстановления до Am(V), их поведение при экстракции, а также концентрацию Pr(III) в растворе контролировали спектрофотометрическим методом (Unicam UV-300, Unicam Instruments, Великобритания) по полосам поглощения при 503 и 814 нм для Am(III), 513 и 717 нм для Am(V), 666 и 996 нм для Am(VI) и 445 и 592 нм для Pr.

В экстракционных экспериментах использовали 30%-ный раствор ТБФ в Изопаре М, который предварительно контактировали в течение 5 мин с равным объемом раствора 0.1 моль/л HNO_3 , содержащего 0.2 моль/л $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$.

Перед экстракцией в полученные растворы, содержащие Am(VI) или Am(V), а также трехвалентные Cm и Pr, вносили навеску NH_4NO_3 для достижения его концентрации в растворе 8 моль/л, как и в работе [13]. Экстракцию актинидов и Pr проводили в течение 1 мин при соотношении водной (ВФ) и органической фаз (ОФ) 1 : 5.

Как было определено нами ранее [13], для установления термодинамического равновесия при распределении Am(III) и Cm между азотнокислым раствором, содержащим NH_4NO_3 , в качестве высаливателя, и 30%-ным ТБФ в изопаре М достаточно 1 мин. Фазы приводили в контакт с друг другом, встряхивая пробирки вручную в течение 1 мин. Затем фазы центрифугировали для их расслаивания в течение примерно 1 мин при скорости вращения 2000 об/мин. Далее разделяли фазы и проводили анализ.

Общую концентрацию Am и Cm в использованных растворах определяли методом альфа-спектрометрии (Alpha Analyst, Canberra, США).

Используемые в работе нитрат аммония, гексагидрат нитрата празеодима, персульфат аммония, азотная кислота и пероксид водорода имели квалификацию ч.д.а.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 показан спектр (1) исходного раствора 0.1 моль/л HNO_3 , содержащего трехвалентные Am, Cm и Pr с концентрациями, приведенными в табл. 1, а также спектр (2) того же раствора после количественного окисления Am(III) до Am(VI) по методике, описанной в экспериментальной части. Как видно из рис. 1, присутствие в растворе даже почти 100-кратного избытка Pr по сравнению с Am (10.5 и 0.13 г/л соответственно) не влияет на процесс окисления Am(III).

Предварительно исследовали экстракцию Am(VI) и трехвалентных Cm и Pr из 0.1 моль/л HNO_3 в присутствии 8 моль/л NH_4NO_3 30%-ным ТБФ в Изопаре М (табл. 1). Из приведенных в табл. 1 данных видно, что в исследуемых условиях с высокой степенью экстрагируются (до 95 мас%) как трехвалентные Cm и Pr, так и Am(VI). Коэффициенты распределения (D) Am(VI), Cm(III) и Pr(III) за одну экстракцию составили около 2.5, 3.6 и 1.8

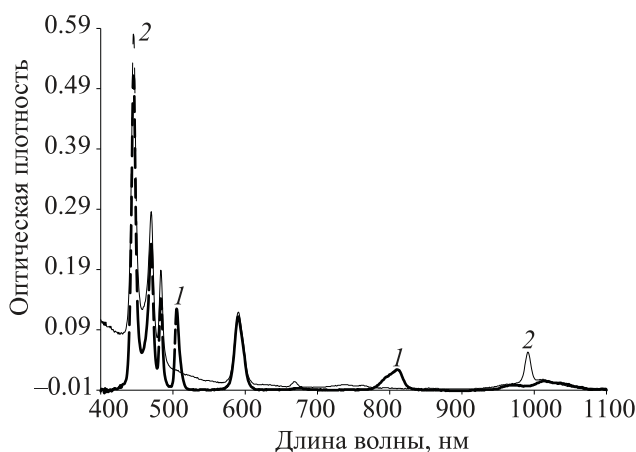


Рис. 1. Спектры поглощения Pr(III) и Am(III) в 0.1 моль/л HNO₃ (1) и того же раствора после количественного окисления Am(III) до Am(VI) (2).

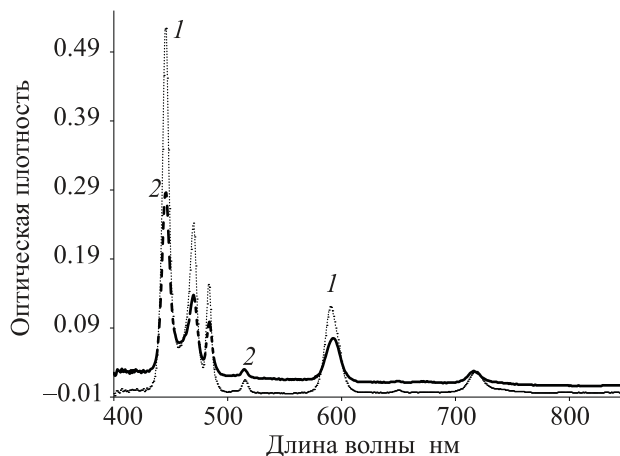


Рис. 2. Спектры раствора Am(V) и Pr(III) в 0.1 моль/л HNO₃ до (1) и после (2) внесения в него высаливателя (8 моль/л NH₄NO₃).

соответственно. $D_{Am(VI)} = 2.5$ соотносится с данными работы [21], где максимальный коэффициент распределения был достигнут при 4 М HNO₃ и минимальном времени контакта фаз, а также несколько ниже, чем в статье, где для экстракции использовался 100%-ный ТБФ [16]. Спектрофотометрическим методом подтвердили также, что в ОФ Am(VI) восстанавливается в основном до Am(V) и частично до Am(III), а после 1 сут хранения Am(V) полностью переходит в Am(III). Однако в отдельных работах отмечены противоречия по вопросу устойчивости Am(VI) в присутствии ТБФ. Так, авторы работ [14, 16] указывают на относительную устойчивость Am в присутствии ОФ, в тоже время в работе [21] заявлено, что контакт с ОФ приводил к быстрому восстановлению америция, в результате чего получался более низкий $D(Am)$, чем ожидалось. Таким образом, из данных табл. 1 можно сделать вывод, что Am(VI), так же как трехвалентные Cm и Pr,

успешно экстрагируется 30%-ным ТБФ в Изопаре М из 0.1 моль/л HNO₃ в присутствии высаливателя NH₄NO₃, поэтому этот подход к отделению Am(VI) от Cm и лантанидов в данных условиях технологически нереализуем.

Исследовали экстракцию Am(V) и трехвалентных Cm и Pr из 0.1 моль/л HNO₃ в присутствии 8 моль/л NH₄NO₃ 30%-ным ТБФ в Изопаре М. Предварительно подтвердили, что добавление высаливателя NH₄NO₃ к раствору не приводит к изменению состояния окисления Am(V) (рис. 2). Выполнили эксперименты, в которых содержание Pr составляло 1.05 или 10.5 г/л при постоянном содержании Am(V) и Cm; экстракцию проводили при соотношении ВФ : ОФ = 1 : 5.

Из представленных в табл. 2 результатов видно, что различное содержание Pr не приводит к изменению степени извлечения Am(V) за одну стадию

Таблица 1. Экстракция Am(VI), Cm(III) и Pr(III) из 0.1 моль/л HNO₃ в присутствии высаливателя (8.0 моль/л NH₄NO₃) 30%-ным ТБФ в Изопаре М. Содержание Am, Cm и Pr в исходном растворе 0.13, 1.38×10^{-4} и 10.5 г/л соответственно; соотношение объемов ВФ : ОФ = 1 : 5

Раствор	Элемент	Концентрация элемента, г/л	D	Содержание элемента в растворе, мас% от исходного
Экстракт	Am	2.42×10^{-2}	2.5	92.7
	Cm	2.62×10^{-5}	3.6	94.7
	Pr	1.89	1.8	90.0
Рафинат	Am	9.49×10^{-3}	—	7.3
	Cm	7.31×10^{-6}	—	5.3
	Pr	1.05	—	10

Таблица 2. Экстракция Am(V), Cm(III) и Pr(III) из 0.1 моль/л HNO₃ в присутствии высаливателя (8.0 моль/л NH₄NO₃) 30%-ным ТБФ в Изопаре М. Концентрации Am, Cm и Pr в исходном растворе 0.13, 1.38 × 10⁻⁴ и 10.5 мг/мл соответственно; соотношение объемов ВФ : ОФ = 1 : 5

№ опыта	Раствор	Элемент	Концентрация элемента, мг/мл	<i>D</i>	Содержание элемента в растворе, мас%	SF
1	Рафинат	Am	8.64 × 10 ⁻²		67	9.9 ^a 11.5 ^b
		Cm	2.35 × 10 ⁻⁵		17	
		Pr	1.58		15	
	Экстракт	Am	8.72 × 10 ⁻³	0.10	33	
		Cm	2.29 × 10 ⁻⁵	0.99	83	
		Pr	1.78	1.15	85	
2	Рафинат	Am	8.77 × 10 ⁻²		68	10.5 ^a 8.1 ^b
		Cm	2.21 × 10 ⁻⁵		16	
		Pr	0.21		20	
	Экстракт	Am	8.46 × 10 ⁻³	0.10	32	
		Cm	2.32 × 10 ⁻⁵	1.05	84	
		Pr	0.17	0.81	80	

^a Фактор разделения SF_{Cm/Am}.

^b SF_{Pr/Am}.

экстракции. Коэффициент распределения Am(V) оказался равным около 0.1; америций извлекается в ОФ не более, чем на 30% от его содержания в исходном растворе, что согласуется с данными работы [13]. При этом коэффициенты распределения Pr и Cm оказались весьма близки – около 1 (табл. 2), а степень их извлечения составляла 80–85% за один цикл экстракции.

При этом отмечено, что фактор разделения SF_{Cm/Am} оказался существенно ниже, чем в работе [13], когда удавалось извлекать Cm практически нацело в ОФ и SF_{Cm/Am} составлял 65. Очевидно, это можно объяснить влиянием присутствующего в растворе более чем стократного количества Pr относительно исходного содержания Am, а также следует учитывать, что концентрации Am, Cm в исходном растворе были на несколько порядков выше (0.13 и 1.38 × 10⁻⁴ соответственно), чем в работе [13].

В то же время показано, что фактор разделения может быть повышен при использовании трехстадийной экстракции при соотношении объемов ВФ : ОФ = 1 : 1, как это было продемонстрировано на примере Pr в отсутствие ТПЭ (табл. 3). В этом случае степень его извлечения достигала 98%, даже несмотря на то, что суммарный объем экстрагента был в 1.6 раза меньше, чем в случае одностадийной экстракции с отношением ВФ : ОФ = 1 : 5.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что около 30% Am(V) извлекается 30%-ным раствором ТБФ в Изопаре М из 0.1 моль/л HNO₃ в присутствии 8 моль/л NH₄NO₃ за одностадийную экстракцию при отношении объемов ВФ : ОФ = 1 : 5, в то время как Cm и Pr извлекаются более, чем на 80%. При этом на примере Pr показано, что замена одностадийной экстракции с отношением ВФ : ОФ = 1 : 5 на трехстадийную с

Таблица 3. Экстракция Pr(III) из 0.1 моль/л HNO₃ в присутствии высаливателя (8.0 моль/л NH₄NO₃) 30%-ным ТБФ в Изопаре М при использовании трехстадийной экстракции при соотношении объемов ВФ : ОФ = 1 : 1

№ стадии	[Pr(III)], 0.046 М	Содержание РЗЭ в растворе от его исходного содержания, мас%	<i>D</i>
1-ая	Рафинат-1	51.2	1.0
	Экстракт-1	48.8	
2-ая	Рафинат-2	10.5	8.5
	Экстракт-2	89.5	
3-ая	Рафинат-3	1.2	82.3
	Экстракт-3	98.8	

отношением объемов ВФ : ОФ = 1 : 1 позволяет количественно извлекать Cm и Pr.

Основной проблемой использования Am(V) для его отделения от Cm и РЗЭ является его восстановление до хорошо экстрагируемого в этих условиях Am(III), происходящее под действием продуктов радиолиза [22], диспропорционирования Am(V) [23] и вследствие контакта с ОФ. Нахождение условий, при которых извлечение Am(V) в ТБФ будет минимальным без замены ТБФ на экстрагент TODGA, пока недоступный для промышленной технологии, как это сделано в работах [24, 25], позволит достичь количественного отделения америция от кюрия, а также лантанидов.

Таким образом, важной задачей будущих исследований является стабилизация америция в его малоэкстрагируемой форме Am(V).

ФОНДОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение о предоставлении гранта № 075-15-2020-782).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. OECD-NEA Potential Benefits and Impacts of Advanced Nuclear Fuel Cycles with Actinide Partitioning and Transmutation; Nuclear Energy Agency (NEA). Paris: OECD, 2011. P. 78.
2. Винокуров С.Е., Куляко Ю.М., Маликов Д.А., Перевалов С.А., Пилюшенко К.С., Савельев Б.В., Трофимов Т.И., Федоров Ю.С. // Патент RU 2774155. Приоритет от 27.07.2021
3. Modolo B.G., Wilden A., Geist A., Magnusson D., Malmbeck R.A. // *Radiochim. Acta.* 2012. Vol. 100. P. 715.
4. Salvatores M., Slessarev I., Ritter G., Fougeras P., Tchistiakov A., Youinou G., Zaetta A. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A.* 1998. Vol. 414, N 1. P. 5.
5. Morss L.R., Edelstein N.M., Fuger J. *The Chemistry of Actinide and Transactinide Elements.* New York: Springer, 2006. Vol. 2.
6. Morss L.R., Edelstein N.M., Fuger J. *The Chemistry of Actinide and Transactinide Elements.* New York: Springer, 2006. Vol. 3.
7. Matveev P.I., Mohapatra P.K., Kalmykov S.N., Petrov V.G. // *Solvent. Extr. Ion Exch.* 2021. Vol. 39, N 7. P. 679.
8. Hudson M.J., Harwood L.M., Laventine D.M., Lewis F.W. // *Inorg. Chem.* 2013. Vol. 52, N 7. P. 3414.
9. Runde W.H., Mincher B.J. // *Chem. Rev.* 2011. Vol. 111, N 9. P. 5723.
10. Mincher B.J.; Martin L.R.; Schmitt N.C. // *Solvent Extr. Ion Exch.* 2012. Vol. 30, N 5. P. 445.
11. Мясоедов Б.Ф., Молочникова Н.П., Лебедев И.А. // *ЖАХ.* 1971. Т. 26, № 10. С. 1984.
12. Каралова З.В., Букина Т.И., Лавринович Е.А., Трофимов Т.И., Куляко Ю.М., Мясоедов Б.Ф. // *Радиохимия.* 1988. Т. 30, № 2. С. 203.
13. Куляко Ю.М., Маликов Д.А., Трофимов Т.И., Винокуров С.Е., Пилюшенко К.С., Зевакин Е.А., Мясоедов Б.Ф. // *Радиохимия.* 2018. Т. 60, № 1. С. 19.
14. Kamoshida M., Fukasawa T., Kawamura P. // *J. Nucl. Sci. Technol.* 1999. Vol. 36, N 6. P. 535.
15. Koma Y., Aoshima A., Kamoshida M., Sasahira A. // *J. Nucl. Sci. Technol.* 2002. Vol. 39, N 3. P. 317.
16. Kamoshida M., Fukasawa T. // *J. Nucl. Sci. Technol.* 1996. Vol. 33, N 5. P. 403.
17. Фёдоров Ю.С., Куляко Ю.М., Блажева И.В., Голецкий Н.Д., Зильберман Б.Я., Металиди М.М., Петров Ю.Ю., Рябкова Н.В., Винокуров С.Е., Трофимов Т.И., Мясоедов Б.Ф. // *Радиохимия.* 2016. Т. 58, № 3. С. 229.
18. Ермаков В.А., Рыков А.Г., Тимофеев Г.А. // *Радиохимия.* 1971. Т. 13. С. 826.
19. Moore F.L. // *Anal. Chem.* 1963. Vol. 35. P. 715.
20. Mincher B.J., Schmitt N.C., Schuetz B.K., Shehee T.C., Hobbs D.T. // *RSC Adv.* 2015. Vol. 5. P. 27205.
21. Mincher B.J., Martin L.R., Schmitt N.C. // *Inorg. Chem.* 2008. Vol. 47. P. 6984.
22. Hall G.R., Herniman P.D. // *J. Chem. Soc.* 1954. P. 2214.
23. Horne G.P., Grimes T.S., Bauer W.F., Dares C.J., Pimblott S.M., Mezyk S.P. Mincher B.J. // *Inorg. Chem.* 2019. Vol. 58, N 13. P. 8551.
24. Wang Lu J.B., Dong X., Yan Q., Feng X.G., Hu H.S., Wang S.A., Chen J., Li J., Xu C. // *J. Am. Chem. Soc.* 2022. Vol. 144, N 14. P. 6383.
25. Wang Z.P., Dong X., Yan Q., Chen J., Xu C. // *Anal. Chem.* 2022. Vol. 94, N 22. P. 7743.